

Sloppy Spin Waves

京大理 富田和久

スピン波 (Spin wave) という言葉は、広範囲にわたる秩序状態 (long range order) を背景としてはじめて明確な意味をもつことは、よく知られている。この考えを単純に延長すれば、常磁性状態においてはスピン波は存在しないという予想を立てる人があっても不思議はない。スピンの励起が波として伝わらなければ、それは拡散するであろう。そこで、stochastic な考えにもとずいて、スピンの揺動に対して拡散方程式をたてるとすれば、拡散係数は帯磁率の逆数に比例するから、転移点に近づくに従って、いわゆる thermodynamic slowing down を起すものと期待される。ところで、磁性体による中性子の非弾性散乱の実験結果は、^{1) 2) 3) 4)} 上記の予想を一応支持しながら、必ずしも stochastic theory の予想するような slowing down を与えなかったもので、これが機縁となって、上記の前提となった考えに対する反省が起ってきた。

そこで考えてみると、秩序状態は、それが必ずしも試料の端から端までいきわたっていなくても、無秩序状態と同一視できないことは明らかである。実際、常磁性状態でも、転移点近傍になれば、有限の空間的領域 (R) にわたって局所的な order parameter (例えば磁化 M) の相関が存在することが知られており、short range order とよばれている。さらに、転移点に近づくに従って、このような相関の寿命がのびることはすでに述べた通りである。このような short range order の存在する状態と、完全に無秩序な状態との相違は、実験的にいかにして捕えられるか。この相違を目にみえる形で捕えうるか、否かは、一にかかって我々がどのような量を観測するかによる。

例えば、coherence range R より波長の長い波を観測する場合には、short range order の存在する状態と、存在しない状態とを区別することは難しいであろう。そして、いずれにせよ、運動の形式としては、単純な

速度論の予想するような拡散型の振舞がみられるであろう。これに対して、coherence range R より波長の短い波をえらんで観測する場合には事情が一変する。すなわち、常磁性状態ではあるが、大きさが R 程度の領域 (cell とよんでおく) の内部では局所的な order parameter の平均値は有限であるから、その意味において T_0 以下の秩序状態と本質的に似た性質を示し、cell の内部におこる揺動に対しては dynamic な復元力が働らくと考えられる。すなわち、スピンの揺動は、緩り拡散するというより、かなりの速度で波動的に伝わりと考えられる。これは、原理的には、スピン波の描像に他ならない。しかし、常磁性状態であるから、上記の cell は強磁性の domain のように時間的・空間的に固定しておらず、cell の形や位置はゆっくりではあるが時間的に変化していくから、前述の波動は T_0 以下の秩序状態を背景にした場合に較べれば、著しく大きな減衰をうけ、実験的にはかなり diffuse なスペクトルとなるであろう。この様な事情を予想して "sloppy spin waves" という nick name が生まれたのである。

5)
(Walter Marshall)

実験的には、はじめ magnetite や、 MnF_2 による中性子の非弾性散乱スペクトルが、転移点近傍で、著しく肩の張った形をしていることがまず注目されたが、最近、 $RbMnF_3$ ^{1) 2) 6) 7) 8)} において、はじめて有限周波数にピークが検出された。さらに、鉄、ニッケル においても定性的に同傾向の測定結果がえられている。実験の結果をみると、 $\omega = 0$ にある拡散型のピークの相対的強度によって line shape は様々の場合があるようにみえる。しかし、line shape の細部よりも重要なことは、単純な stochastic theory の結論にくらべて、line 全体の巾が著しく広く、cell 内部における揺動の伝播がかなり速いことを示している点にある。

それでは単純な stochastic theory はどこに足りない点があったのか？ 元来、スピンの揺動を動かす要因 (driving force) は二種の因子から成っている。すなわち、(1) 局所平衡からのはずれ — という熱力学的原因からくるものと、(2) 実際に働らく力の不釣り合い — と呼ぶべき速度論的な因子 (Onsager's kinetic coefficient) がそれである。単純な stochastic theory では (1) の効果はとり入れているが、(2) の因子

は極めて簡略に扱っており、その不備な点が T_c 附近で目立ってあらわれてきたのである。

実際に、 R より短波長の波の観測に対しては ($kR \gg 1$)、(2) の因子を力学的にやや丁寧に扱うことによって、sloppy spin wave の存在を示す line shape を導くことができる。^{9) 10)} 次に、 R より長波長の波を観測する場合 ($kR \ll 1$) を考える。この場合、line shape はたしかに拡散型であるが、ここでも従来の理論は拡散係数の温度変化を正しく与えないことが、よく知られている。そして、この場合にも、(2) の部分をより綿密に扱う¹⁰⁾ ことによって、拡散係数の正しい温度変化をみちびくことができるのである。¹¹⁾ これは、いわゆる “dynamical scaling law” の一例である。

dynamical scaling の問題に関連して、Ising 模型と Heisenberg 模型の dynamic な相違について、一言しておこう。最近、Ising 模型の kinetics に、隣接スピンの相関を含めた計算の例があり、その結果は (2) の部分が T_c に近づくに従って減少すること、すなわち揺動の伝播は転移点¹²⁾ に近づくに従っておそくなる (slowing down)、ことを示した。この結果に対する一つの直観的解釈は、スピンの向きのそろった cell が大型化するにつれて cell の中心部では spin flip の確率が減るという見方である。¹³⁾ ところで、Heisenberg 模型の場合には、事情はかなり違っている。すなわち、cell が大型化するに従って、sloppy とはいえ、スピン波が立つことになるので、スピン揺動が cell の内部を伝わる速さは 次第に速くなる、と考えられる。実際、Heisenberg 模型の場合には、(2) の部分は T_c に近づくに従って増加し (speeding up)、この増加を考えにいれて始めて、¹⁰⁾ 正しい dynamical scaling law が導かれたのである。

以上のように考えると、“sloppy spin wave” という概念は、従来粗略に扱われていた (2) の因子に対して積極的な関心を誘起した点で重要な意義があり、その成果は dynamical scaling law の理解にまで及んでいる、とみることができる。

Itinerant model の場合にも、sloppy spin wave に類似する概念として “paramagnon” という言葉があるが、この概念の内容を Heisenberg 模型の場合と同一視してよいか否かは問題があるように思われる。

富田和久

最後に、用語について一言。“sloppy spin wave”という言葉はよく実感をあらわしているが、そのまま technical term として将来も生き残るか否かは疑問であろう。事実、同類の現象に対して

- (1) diffuse collective mode⁹⁾
- (2) quasi-collective mode¹⁰⁾
- (3) quasi spin wave¹⁴⁾
- (4) remnant spin wave¹⁵⁾
- (5) fluctuation driven spin wave¹⁶⁾

等、様々の呼称が提案されていることを、付け加えておこう。

文 献

- 1) T. Riste, J. Phys. Soc. Japan, 17 Suppl. B-III 60 (1962).
- 2) K. C. Turberfield, A. Okazaki and R. W. H. Stevenson, Proc. Phys. Soc. 85 743 (1965).
- 3) B. Jacrot, J. Konstantinović, G. Parette and D. Cribier: Symposium on Inelastic Scattering of Neutrons in Solids and Liquids (Vienna) vol. II, 317 (1963); J. Konstantinović: Bull. Boris Kidric Inst. (Belgrade) 17, 329 (1966).
- 4) J. Als-Nielsen, O. W. Dietrich, W. Marshall and P. A. Lindgard: J. Appl. Phys 39, 1229 (1968); Solid State Communications 5, 607 (1967).
- 5) W. Marshall, Critical Phenomena, Proceedings of a Conference, Washington, D. C., 1965.
- 6) R. Nathans, F. Menzinger and S. J. Pickart: J. Appl. Phys. 39, 1237 (1968)

- 7) M.F. Collins, R. Nathans, L. Passell and G. Shirane :
International Conference on Statistical Mechanics
(Sept 9-14 (1968), Kyoto), Abstract p. 133
- 8) R.D. Lowde and C.G. Windsor: J. Appl. Phys. 39, 449
(1968)
- 9) K. Tomita : Japan Atomic Energy Research Institute
1113, 106 (1966) *ibid.* 1157, 80 (1968)
- 10) K. Tomita and T. Kawasaki: International Conference
on Statistical Mechanics (Sept 9-14 (1968), Kyoto),
Abstract p. 105
- 11) B.I. Halperin and P.C. Hoheuberg: Phys. Rev. Letters
19, 700 (1967)
- 12) M. Suzuki, H. Ikari and R. Kubo : International
Conference on Statistical Mechanics (Sept 9-14 (1968)
Kyoto) Abstract p. 103
- 13) M. Fischer : Private Communication.
- 14) J. L. Beeby and J. Hubbard : Phys. Letters 26A, 376
(1968)
- 15) P. Resibois and Leener : Phys. Letters 25A, 65 (1967)
- 16) R. Brout : Phys. Letters 24A, 117 (1967)

*) "para-magnon" もしくは "virtual spin wave" については, 例えば
次の文献にそれ以前の仕事もふれてある。

J. R. Schrieffer : Jour. Appl. Phys. 39 , 642 (1968)